

*В.П. Іващенко, Г.Г. Швачич д-ра техн. наук, О. В. Соболенко канд. техн. наук  
(Україна, м. Дніпропетровськ, Національна металургійна академія України)*

**АВТОМАТИЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ  
НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ  
ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ**

**Вступ**

Технічне переозброєння і реконструкція виробництва крім, проектування і впровадження нових технологічних процесів передбачає також як основний засіб інтенсифікації виробничих процесів, комплексну механізацію і автоматизацію. В останнє десятиліття спостерігається інтенсивний процес впровадження інформаційно-вимірювальних систем. Він обумовлений можливостями сучасної вимірювальної бази, що дозволяє не тільки виконувати вимірювання в повному обсязі та з високою точністю, але і передавати для обробки відповідні дані в обчислювальний комплекс за допомогою різноманітних телекомунікаційних засобів. Наведені в даній статті розробки відрізняються тим, що в них суттєвий акцент робиться на використанні багатопроцесорних обчислювальних систем. Зауважимо, що на сьогодні у світі спостерігається стрімке зростання числа багатопроцесорних обчислювальних систем та їх сумарної продуктивності. Це викликано тим, що такі системи стали загальнодоступними і дешевими апаратними платформами для високопродуктивних обчислень. При цьому різко зріс інтерес до проблематики обчислювальних мереж (GRID) і стає зрозумілим що впровадження таких мереж матиме величезний вплив на розвиток суспільства, порівняний із впливом на нього появи на початку століття єдиних електричних мереж. У зв'язку з цим, розглядаючи проблеми освоєння багатопроцесорних систем, слід брати до уваги і те, що вони є першою сходинкою у створенні таких обчислювальних мереж.

Крім того, сьогодні практика висуває перед ученими-прикладниками різного роду проблеми, повне вирішення яких у більшості випадків можливе лише за рахунок застосування багатопроцесорних обчислювальних комплексів. Так, наприклад, як у гірничому, так і в металургійному виробництві відбувається безліч найрізноманітніших і взаємопов'язаних процесів. У першу чергу, це технології нагріву, прокатки й термічної обробки, а також робота допоміжного устаткування та ін. У той же час, розв'язування зазначених задач за допомогою відомих стандартних підходів являє собою складну проблему, подолання якої можливе тільки за рахунок застосування сучасних багатопроцесорних обчислювальних комп'ютерних технологій. При цьому одна з основних особливостей застосування таких технологій полягає у збільшенні швидкодії та продуктивності обчислень. Висока продуктивність обчислень дозволяє розв'язувати багатовимірні задачі, а також задачі, які вимагають великої кількості процесорного часу. Швидкодія дозволяє або ефективно керувати технологічними процесами, або взагалі створити передумови для розробки нових перспективних технологічних процесів.

*Об'єктом автоматизації* був контроль температурних режимів довгомірного сталевого виробу. Задачі, що розв'язуються за допомогою розробленої автоматизованої системи контролю параметрів технологічних процесів, концентруються в двох напрямках — моніторинг (спостереження в реальному часі за температурними параметрами об'єкта) і ретроспективний контроль, аналіз і корегування температурних режимів обробки довгомірного виробу.

*Інформаційною базою* для роботи розробленої системи є результати вимірювань контрольно-вимірювального устаткування, встановленого на об'єктах, із можливостями архівації і передачі даних в обчислювальну систему. Вибір контрольно-вимірювальних приладів здійснювався відповідно до існуючої схеми технологічних процесів і з урахуванням необхідних техніко-економічних показників, а також подальшої автоматизації локальних контурів. Система охоплює різні технологічні процеси, такі як процеси нагрівання, витримки та охолодження. Підбір устаткування здійснювався з позицій забезпечення надійності, а також мінімізації вартості монтажних і пусконаладжувальних робіт, оскільки при великих теплових навантаженнях істотно зростає трудомісткість установки обладнання. Безпосередньо обробка даних технологічного процесу здійснюється за допомогою багатопроцесорної обчислювальної системи.

У зв'язку з цим зауважимо, розробка й використання багатопроцесорних обчислювальних комплексів з їх математичним та програмним забезпеченням є актуальною проблемою, що дозволяє значно скоротити кількість експериментальних досліджень і час, потрібний на їх проведення, а це дозволяє одержати необхідну інформацію для створення та впровадження різних технологічних нововведень. У сучасних умовах жорсткої конкуренції між світовими виробниками українські дослідники постійно працюють над створенням і реалізацією конкурентоздатних технологій виробництва. Нові технологічні процеси (нагрівання та охолодження з необхідною швидкістю в конкретних температурно-часових умовах), ресурсозбережні технології підготовки заготовки до подальшої обробки – це найважливіші перспективні напря-

ми розвитку гірничо-металургійного комплексу та машинобудування. Контроль технологічних параметрів та керування різноманітними технологічними процесами можна забезпечити за рахунок застосування багатопроекторних обчислювальних комплексів.

### Постановка проблеми досліджень

У даній роботі ставилася задача автоматизації контролю параметрів технологічного процесу термічної обробки довгомірного виробу. Безпосередньо заготовка повинна пройти режим термічної обробки на (рис. 1.) Яка здійснюється шляхом нагрівання заготовки в межах міжкритичної зони температур. Для заданого матеріалу встановлено такі значення критичних точок:  $A_{c1} = 725\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $A_{c3} = 795\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Нагрівання має відбуватися до такого значення:  $A_{c1} + (10 - 30\text{ }^{\circ}\text{C})$ . Протягом наступного етапу обробки матеріалу необхідно реалізувати процес ізотермічної витримки протягом 45 с. Далі тривало охолодження виробу зі швидкістю  $20 - 30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до температури  $620\text{ }^{\circ}\text{C}$  з подальшою ізотермічною витримкою протягом 45 с. Нарешті, на останньому етапі обробки матеріалу зразок нагрівали зі швидкістю  $15 - 25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  до підкритичних температур.

Застосування автоматизованого контролю параметрів процесу термічної обробки виробу має на меті поліпшення технологічних властивостей заготовки за рахунок забезпечення високої дисперсності й однорідності структури зразка на всій площині перерізу. При цьому технологічний процес повинен набувати таких переваг, як висока продуктивність, знижене енергоспоживання, покращення експлуатаційних характеристик. Зазначених властивостей технологічного процесу вдалося досягти за рахунок застосування багатопроекторної обчислювальної системи [1, 2]. Багатопроекторна обчислювальна система монтується у вигляді окремого модуля і дозволяє за допомогою спеціального програмного забезпечення задавати й контролювати необхідні температурні режими на всій площині перерізу зразка при нагріванні й витримці матеріалу.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

До прогресивних технологій, які дозволяють принципово змінити традиційні малопродуктивні енергомісткі процеси, можна віднести адаптовані до умов метизного виробництва методи швидкісного нагрівання металу (дроту, прутків). При цьому електротермічний спосіб характеризується високою швидкістю нагрівання внаслідок впливу явищ електромагнітної індукції (індукційне нагрівання) або електроопору (електроконтактне нагрівання) [3]. Запропонована технологія передбачає, що заготовка нагрівається в міжкритичний інтервал температур (МКІТ) з подальшою витримкою і швидким її охолодженням, причому для забезпечення стабільності властивостей необхідно підтримувати точний температурний режим. Безперечні переваги електротермічної обробки такі: надання сталевим виробам більш цінних властивостей, що зумовлюється специфічним впливом високої інтенсивності нагрівання на механізм і кінетику структурних змін у сталі, обмеженим окалиноутворенням і знеуглецюванням, уникненням забруднень доквілля, скороченням тривалості термічної обробки (ТО) в десятки разів. Запровадження індукційного нагрівання у технологічній лінії для ТО дроту вже відоме у виробничій практиці [4]. Разом з тим описаний процес термічної обробки має певні недоліки, а саме:

1. Відсутність контролю температурних режимів нагрівання, витримки й охолодження під час ТО металу.
2. Режим термічної обробки заготовки передбачає значну тривалість технологічного процесу (за даними авторів, від 30 до 90 хвилин), що не дозволяє синхронізувати замкнутий цикл виготовлення відповідних виробів.

### Виклад основного матеріалу досліджень

Щоб вирішити розглянуті проблеми, було розроблено установку для термічної обробки довгомірного сталевого виробу [5]. При цьому дослідження, спрямовані на вивчення особливостей ТО металу за допомогою такої установки, набули свого розвитку в роботах [6 – 8]. На рис. 2 подано блок-схему контурів системи автоматизованого керування установкою термічної обробки довгомірного сталевого виробу, де прийнято такі позначення: ПОК – персональний обчислювальний кластер; ВМ ПМ – виконавчий механізм протяжного механізму; ВМ БІВТ – виконавчі механізми блоків ізотермічної витримки температури; ВМ БП – виконавчий механізм блока підстуджування; ВМ БН – виконавчий механізм блока нагрівання зразка. Така система керування має у своєму розпорядженні блоки, які дозволяють отримати інформацію про поточні параметри керованих процесів. Особливість її полягає в тому, що на кожному з п'я-

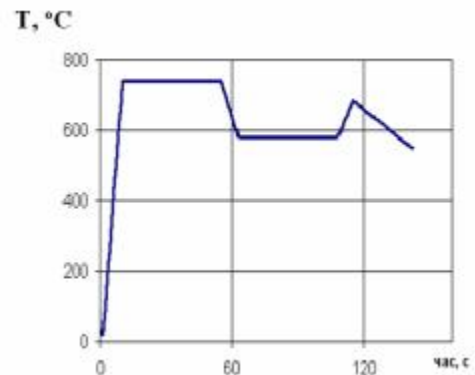
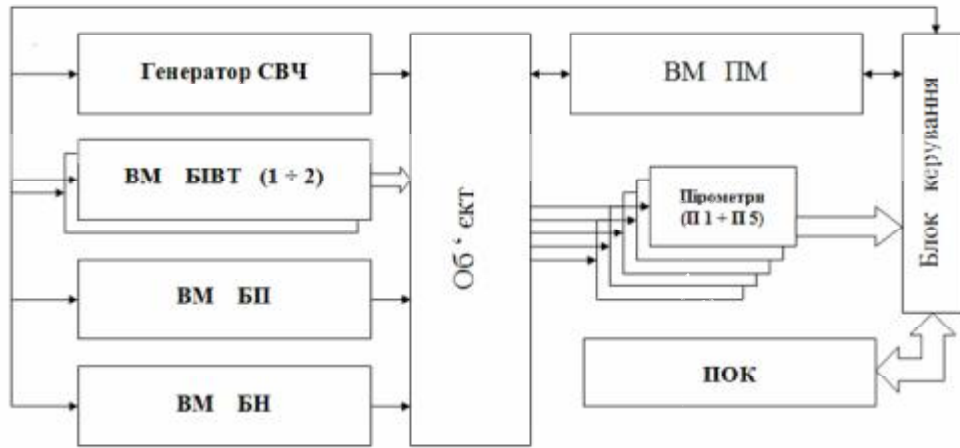


Рис. 1. Графік режиму термічної обробки матеріалу

ти етапів технологічної обробки зразка розв'язується двовимірна задача теплопровідності. При цьому програмні засоби ПОК дозволяють контролювати температурні режими, як на всій площині перерізу зразка, так і по його довжині. Контроль таких температурних режимів здійснюється в центрі площини перерізу зразка.



**Рис. 2. Блок – схема контурів системи автоматизованого керування параметрами технологічного процесу**

*Технічний результат, що досягається при запровадженні запропонованої системи, полягає в тому, що забезпечується висока дисперсність й однорідність структури зразка на всій площині його перерізу, при цьому технологічний процес ТО сталі характеризується високою продуктивністю, малим енергоспоживанням, поліпшеними експлуатаційними характеристиками. Застосування установки для реалізації режиму сфероїдизівного відпалювання зумовлює рівномірний розподіл глобул цементиту у феритній матриці, а тому забезпечує необхідні механічні властивості металу для його подальшої холодної деформації.*

Нижче описано загальну математичну постановку задачі. ПОК із спеціальним програмним забезпеченням як єдина база має математичні моделі у вигляді рівняння теплопровідності, тобто

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + W, \quad (1)$$

при цьому критерій Фур'є  $t = \frac{at}{R^2}$ , якщо  $t > 0$ ,  $W$  – питома потужність у вигляді джерел тепла, Вт/м<sup>2</sup>.

Крайові умови цього рівняння мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} T(0, r, z) &= f(r, t); \\ T(t, 1, z) &= \text{var}; \\ \frac{\partial T(t, 0, z)}{\partial r} &= 0; \\ T(t, 0, z) &\neq 0. \end{aligned}$$

У двох останніх співвідношення в крайових умовах свідчать, що значення температури в ділянці осі циліндра протягом усього процесу теплообміну має бути скінченним. За координатою  $z$  граничні умови, залежно від особливостей розв'язуваної задачі, можуть бути першого, другого або третього роду. Розв'язують задачу (1) із застосуванням методів розкладання, суть яких полягає в редукції складного оператора (1) до простих. Цей підхід дозволяє проінтегрувати дане рівняння як послідовність інтегрування одновимірних рівнянь простішої структури. З огляду на суттєву складність математичної моделі (1) великого значення набуває розробка економічних алгоритмів для розрахунку ефектів керування функціями запропонованої установки. Процес створення зазначених алгоритмів висвітлюється в роботах [9 – 11].

Зауважимо, що тут саме задача керування (як і задача синтезу) в її точній постановці відноситься до класу обернених, оскільки вона передбачає визначення керуючих функціональних параметрів на основі заздалегідь заданого, необхідного результату (обернена задача керування). Алгоритмом розв'язування обернених задач слугує метод "вилки" з попереднім визначенням деякого початкового відрізка. Задача розв'язується в два етапи. На першому реалізується відокремлення мінімуму нев'язки, на другому визначається мінімум шуканої функції керування з відокремленого інтервалу. Зазначена процедура реалізується стандартно. Інакше кажучи, якщо  $J$  являє собою деяке дійсне значення шуканого кореня, тобто, коли  $a \leq J \leq b$ , а  $f(J)=0$ , то можна обчислити число  $w$  такою, що задовольняє умови  $a \leq J \leq b$  та  $|J-w| < \epsilon$ , тобто меншим від будь-якого наперед заданого малого числа  $\epsilon$ . Подібна схема включена до складу математичного апарату керування ПОК. На всіх циклах ТО металу використовується математична модель (1), тому в доній роботі результати моделювання будуть стосуватися циклу первинного нагрівання металу. Проблема моделювання полягає в тому, що для забезпечення необхідної точності і стійкості обчислень доводиться брати розрахункову сітку з чималою кількістю вузлів і виконувати безліч ітерацій. Унаслідок цього число арифметичних операцій, які необхідні для розрахунку температурних полів, перебуває в межах  $10^7 - 10^8$  вузлів, а коли крок за часовою ознакою становить  $10^{-2}$  с, то загальна кількість вузлів для обчислень може досягти  $10^{20}$  і більше. Однопроцесорні обчислювальні системи не можуть впоратись з таким навантаженням під час моделювання в реальному масштабі часу, тому найбільш виправданим буде застосування багатопроцесорних систем, що й було здійснено з метою удосконалення технології ТО довгомірного сталевого виробу.

*Експериментальні дослідження.* Для випробування функцій запропонованої установки було проведено кілька експериментів, коли дріт діаметром 20 мм із сталі 20Г2Р піддавався ТО. Розглянемо два характерні досліди. На рис. 3 зображено криві розподілу температури зразка на площині його перерізу, де  $T_n$  – температура нагрівання поверхні зразка,  $T_k$  – контрольована засобами ПОК температура фазового перетворення металу ( $A_{c1}$ ) на площині перерізу зразка. Особливість контролю температури зразка полягає в забезпеченні прогрівання усієї його маси до температур, заданих певним режимом. Криві розподілу температури в зразку характеризують особливість прогрівання металу на всій площині його перерізу. Моделювання таких температурних полів здійснюється з урахуванням зміни теплофізичних властивостей матеріалу під час його нагрівання.

На рис. 4 подано криві розподілу температури зразка по довжині в процесі його нагрівання, де цифрою 1 позначено температуру поверхні ( $T_n$ ), а 2 – температуру в центрі площини перерізу. Тут зона I відображає процес нагрівання зразка до заданої температури на його поверхні, а зона II демонструє вихід на заданий температурний режим у центрі площини перерізу зразка.

У ході експерименту було проаналізовано структуру матеріалу зразків. На рис. 5, а зображено початкову феритно-бейнітну (мартенситну) структуру металу. Остаточний вигляд структури матеріалу після сфероїдизації подано на рис. 5, б. Структура являє собою перліт зернистий із стандартною оцінкою в 2 бали, його твердість становить 148 – 169 НВ.

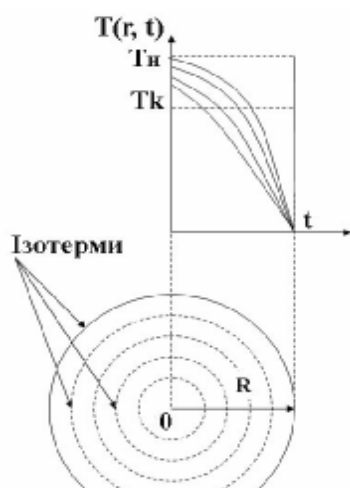


Рис. 3. Криві розподілу температури зразка на площині його перерізу

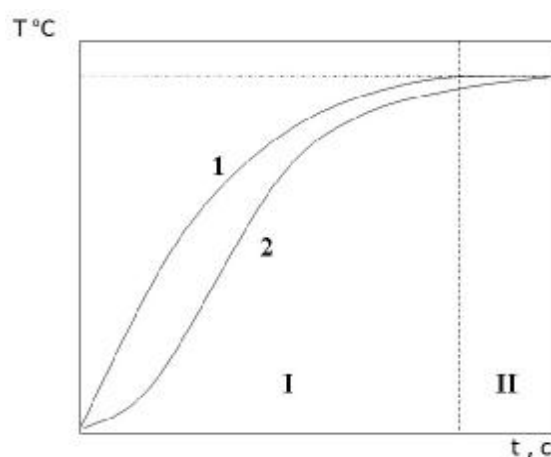


Рис. 4. Графіки розподілу температури зразка по його довжині в процесі нагрівання

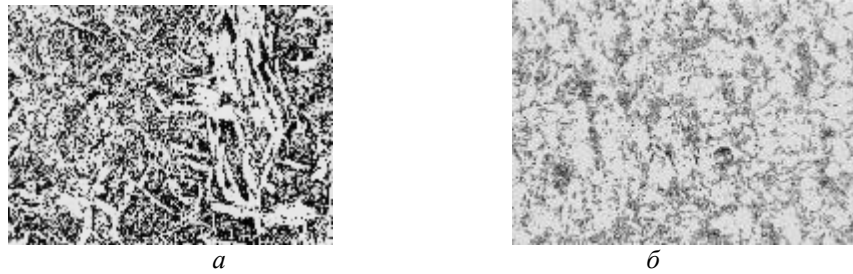


Рис. 5. Мікроструктура сталі 20Г2Р

Отже, виконана сфероїдизація заготовки в умовах відповідних режимів ТО надає матеріалу структури зернистого перліту. Причому швидкісна сфероїдизація зумовлює більш рівномірний розподіл глобул цементиту у феритній матриці (рис. 5, б). Зразки із сталі майже однакової твердості після ТО набули дрібнодисперсної структури, що забезпечує більш високий рівень пластичності металу. Унаслідок швидкого нагрівання зразка й неповної аустенізації сталі відбуваються певні зміни в морфології карбідної фази від пластинчастої до дрібнодисперсної глобулярної.

### Висновки і перспективи подальших досліджень

Удосконалення наявних й створення нових технологічних процесів вимагають значних витрат, пов'язаних із проведенням великої кількості натурних експериментів на лабораторному, дослідно-промисловому устаткуванні, а також у виробничих умовах. Зменшення кількості експериментальних досліджень та часу на їх проведення з одержанням необхідної інформації для побудови й упровадження технологічних розробок можна здійснити шляхом розробки систем автоматизованого контролю параметрів технологічних процесів на основі застосування багатопроекторних обчислювальних комплексів. У даній роботі розроблено систему, яка використовується з метою вивчення швидкісних режимів ТО довгомірних виробів та створення нових технологій, режимів й устаткування для їх теплової обробки.

Упровадження запропонованої автоматизованої системи дало можливість:

по — перше, здійснювати контроль технологічних параметрів у режимах ТО металу, зокрема, температури в центрі перерізу металевого виробу, що забезпечує надання матеріалу необхідних властивостей, причому на всій площині перерізу та по довжині;

по — друге, контролювати температуру нагрівання, витримки й охолодження на всій площині перерізу зразка, застосовуючи з цією метою багатопроекторну обчислювальну систему, тим самим підвищити якісні показники термічно обробленої сталі;

по — третє, скоротити тривалість процесу сфероїдизаційного відпалювання металу;

по — четверте, зменшити енергоспоживання;

по — п'яте, значно поліпшити умови експлуатації, а також стан довкілля.

Крім того відзначимо, що розв'язування задач, визначених в даній роботі, зазвичай, відбувається на основі застосування апарата різницевих рівнянь, який передбачає обов'язкову заміну похідних різницевиими співвідношеннями. Виконані в даній роботі дослідження показують, що методи розв'язування задач даного класу мають бути не тільки різноманітними, але й поєднувати оцінювання кількісних показників із можливостями якісного аналізу. На сьогодні намітилися певні тенденції в розробці числово-аналітичних методів із складною логічною структурою, але вони мають порівняно з кусково-різницевиими методами вищий порядок точності й можливість побудови алгоритмів, адаптованих за порядками апроксимації. З обчислювальної точки зору такий підхід відрізняється певною громіздкістю, але він дає своєрідний еталон для порівняння з іншими практичними методами. Але, зважаючи на переваги проведення обчислювального експерименту засобами багатопроекторної системи, можна стверджувати, що обставина, яка стримувала розвиток числово-аналітичного підходу, на сьогодні втрачає свою актуальність. У зв'язку з цим для розв'язування моделі (1) у даній роботі набула подальшого розвитку ідея розробки схем підвищеного порядку точності на основі числово-аналітичного підходу.

### Список літератури

1. Модуль високоефективної багатопроекторної системи підвищеної готовності. Пат. 57663 Україна, МПК G06F 15/16 (2011.01). / Іващенко В.П., Башков Є.О., Швачич Г.Г., Ткач М.О.; заявник: Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № u 2010 09341; заявл. 26.07.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5.
2. Персональный вычислительный кластер для моделирования многомерных нестационарных задач. Иващенко В.П. / В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич // Материали XVI международной научно-технической конференции [Прикладные задачи математики и механики]. – Севастополь, 2008. – С. 235 – 239.

3. Электротермическая обработка и теплое волочение стали / Г.А. Хасин, А.И. Дианов, Т.Н. Поповаи др.– М.: Металлургия, 1984. – 152 с.
4. Подготовка структуры при электротермообработке сталей, применяемых для высадки высокопрочных крепежных изделий / М.В. Бобылев, В.Е. Гринберг, Д.М. Закиров, Ю.А. Лавриненко // Сталь. – 1996. – № 11. – С. 54 – 60.
5. Установка для термічної обробки довгомірного сталевго виробу. Пат. 61944 Україна, МПК С21D 1/26 (2006.01), G06F 15/16 (2006.01). Іващенко В.П., Башков Є.О., Швачич Г.Г., Ткач М.О.; заявник: Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № u 201014225; заявл. 29.11.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15.
6. Information system of intelligent support of decision-making for rolling process V. Ivaschenko, G. Shvachych, A. Sobolenko, D. Protopopov // Eastern-europeanjournal of enterprise technologies. – 2003. – № 3. – P. 4 – 9.
7. Информационная система сопровождения трубопрокатного агрегата 140 со станами тандем / Г.Г. Швачич, А.В. Соболенко, Д.В. Протопопов, А.В. Чуев // Теория и практика металлургии. – № 5 – 6. – 2003. – С. 76 – 82.
8. Математическое моделирование скоростных режимов термической обработки длинномерных изделий / Г.Г. Швачич, В.П. Колпак, М.А. Соболенко // Теория и практика металлургии.: общегосударственный науч.-техн. Журн. – 2007. – № 4 – 5 (59 – 60). – С. 61 – 67.
9. Швачич Г.Г. Об алгебраическом подходе в концепции распределенного моделирования многомерных систем / Г.Г. Швачич // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 6(61). – С. 73 – 78.
10. Швачич Г.Г. Математическое моделирование одного класса задач металлургической теплофизики на основе многопроцессорных параллельных вычислительных систем / Г.Г. Швачич // Математичне моделювання. – 2008. – № 1 (18). – С. 60 – 65.
11. Швачич Г.Г. Некоторые особенности конструирования алгоритмов для многопроцессорных вычислительных систем / Г.Г. Швачич, Шмукин А.А. // Міждержавна науково-методична конференція «Проблеми математичного моделювання». – Дніпродзержинськ, 2011. – С. 112 – 114.

*Рекомендовано до друку проф. Пошиваловим В.П.*

УДК 622.233.6-83:68:3

**В.С.Хилов, д-р техн. наук**

*(Украина, г.Днепропетровск, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»),*

**К.П.Фофанов**

*(Украина, г. Днепропетровск, Государственное предприятие «Конструкторское бюро Южное»)*

## **ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЕ С УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ**

**Постановка проблемы и связь с прикладными задачами.** Тенденция применения регулируемого частотного электропривода с короткозамкнутым асинхронным двигателем вместо приводов постоянного тока объясняется лучшими эксплуатационными характеристиками и решением технологических задач в области силовой электроники, цифровых систем управления и достижениями в теории автоматизированного электропривода [1].

Применение приводов постоянного тока характеризуется относительно большими моментами инерции якоря двигателя в сравнении с приведенными моментами инерции механизма. Частота коммутации тиристорных приводов относительно небольшая, что приводит к увеличенным значениям «малой некомпенсированной» постоянной времени. Поэтому тиристорные приводы постоянного тока являются низкочастотными фильтрами, которые эффективно подавляют собственные колебания, возникающие в трансмиссии бурового станка.

Широтно-импульсное управление транзисторными инверторами напряжения характеризуется значительно большей частотой коммутации, нежели тиристорного выпрямителя привода постоянного тока, что приводит к расширению полосы пропускания системой регулирования в приводе переменного тока. У асинхронного двигателя момент инерции ротора более чем в четыре раза меньше момента инерции двигателя постоянного тока. Такие технические изменения в приводных системах приводят к увеличению влияния оборотной электродвижущей силы (ЭДС) и упругих свойств трансмиссии на контуры